

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

ПАНЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ВАЛЕНТИНОВИЧ



УДК 620.168; 624.21.095.32; 691-42

**НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК,
ПІДСИЛЕНИХ КОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ, ЗА ЕНЕРГЕТИЧНИМ
ПІДХОДОМ**

05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ 2019

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі залізобетонних та кам'яних конструкцій Київського національного університету будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Журавський Олександр Дмитрович
Київський національний університет будівництва та архітектури,
завідувач кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Савицький Микола Васильович
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,
ректор

кандидат технічних наук, професор
Коваль Петро Миколайович
Національна академія образотворчого мистецтва та архітектури,
завідувач кафедри архітектурних конструкцій

Захист відбудеться «17» травня 2019 р. о 13⁰⁰ годині в ауд. 319 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.04 при Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий «15» квітня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д
26.056.04 к.т.н., доцент



Д.В. Михайловський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На даному етапі розвитку суспільства спостерігаються значні об'єми робіт з відновлення і підсилення залізобетонних конструкцій та споруд у зв'язку із суттєвим зношенням основних фондів. Невід'ємними елементами в автодорожній галузі є мости, їх ресурс роботи вичерпано на 50 і більше відсотків. У зв'язку з цим виникає проблема продовження терміну експлуатації існуючих, а, також, розробка новітніх технологій та методики при проектуванні нових споруд підвищеної безпеки та вантажопідйомності.

У зв'язку із розробкою та виготовленням матеріалів, що армовані вуглецевими, скляними і ін. волокнами у світовій практиці розвився напрямок підсилення залізобетонних конструкцій матеріалами, створеними на їх основі.

Нові системи підсилення на основі волокон виявились найбільш продуктивними для забезпечення надійності конструкцій, які експлуатуються, та вичерпують свою несучу здатність.

Використання вуглепластиків дає можливість не тільки підвищити міцність таких конструкцій, але і збільшити жорсткість і разом з тим продовжити термін експлуатації. Проблема забезпечення несучої здатності та надійності виникає і при проектуванні нових споруд, оскільки використання високоміцних матеріалів знижує трудовитрати при будівництві.

Дослідженнями різних аспектів цієї проблеми займалися як вітчизняні, так і зарубіжні вчені. Тут слід відмітити Бліхарського З.Я., Барабаша В.М., Бамбуру А.М., Квашу В.Г., Ковалю П.М., Савицького М.В., Шагіна А.Л., Гладишева А.Б., Lagodu M., Landera M., Karamda R., Frehel M. та інших.

Тому, для безаварійної експлуатації споруд, необхідно розробляти нові, науково-обґрунтовані способи підсилення мостів при ремонті і реконструкції. В роботах зарубіжних вчених розроблено ряд нормативно - технічних документів, які передбачають основні принципи підсилення залізобетонних конструкцій та визначення їх несучої здатності.

Особливу увагу необхідно приділяти методиці розрахунку залізобетонних конструкцій, підсиленних композитними матеріалами, яка розроблена і підтверджена результатами теоретико - експериментальних досліджень і досвідом експлуатації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження експериментального, теоретичного і прикладного характеру виконувались в рамках державної програми згідно з тематичним планом науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт державного агентства автомобільних доріг України:

1. «Методика розрахунку підсилення мостових залізобетонних балок додатковим зовнішнім армуванням з застосуванням металевих і композитних підсилюючих елементів М218-02071010-6-5:2006».

2. «Методика розрахунку напружено-деформованого стану та міцності залізобетонних мостових балок підсилених зовнішнім армуванням, на основі деформаційної моделі М218-02071010-635:2007».

За комплексною програмою наукових досліджень НАН України: «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» за проектом «Методика визначення залишкового ресурсу залізобетонних мостових балок та розроблення технічних засобів моніторингу деформацій», державний реєстраційний номер 0115U004015.

При виконанні д/д тематики «Обстеження технічного стану підземного переходу ст. метро «Святошин» м. Київ», згідно завдання на проектування «Капітальний ремонт станції «Святошин» Святошинсько - Броварської лінії метрополітену».

В зазначених дослідженнях здобувач брав участь в якості співавтора.

Мета і задачі дослідження.

Метою дисертаційної роботи є розробка методики оцінювання довговічності залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами, і залишкового ресурсу роботи на основі енергетичного підходу і розвитку пошкоджень в матеріалі за циклічного деформування та технічних засобів неруйнівного контролю і використання запропонованого способу після реконструкції залізобетонних конструкцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. провести аналітичний огляд відомих методів підсилення залізобетонних балок та методології їх розрахунку;
2. розробити розрахункову модель та методику оцінювання довговічності залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами, за їх циклічного деформування;
3. сформулювати експериментальну методику з визначення несучої здатності і довговічності залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами, за статичного та циклічного навантажень;
4. розробити методику оцінювання напружено-деформованого стану залізобетонних балок на основі методу оптико-цифрової кореляції зображень (ЦКЗ);
5. дослідити міцність і деформативність клейового з'єднання з використанням неруйнівних методів контролю;
6. провести порівняння даних, отриманих експериментальним шляхом з розрахунковими та числовими методами;
7. здійснити перевірку розроблених методик та отриманих результатів при випробуванні мостових конструкцій за реальних умов експлуатації.

Об'єктом досліджень є процеси деформування і руйнування залізобетонних конструкцій, підсилених композитною стрічкою, за циклічного навантаження.

Предметом досліджень є залізобетонні елементи, що підсилені зовнішнім армуванням та їх міцність і довговічність.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є теоретико-експериментальні підходи на основі загальної теорії залізобетону, методи механіки деформівного твердого тіла, неруйнівні методи контролю деформівного стану матеріалу.

Наукова новизна отриманих результатів. Під час дисертаційного дослідження були отримані наступні результати.

- *Вперше* сформульовано розрахункову модель руйнування підсилених залізобетонних балок за циклічного навантаження з використанням енергетичного підходу.

- *Вперше* експериментальним шляхом побудовано діаграми втоми для підсилених залізобетонних балок на основі яких встановлюють кількість циклів до руйнування за величиною розмаху деформацій.

- *Вперше* розроблено метод визначення розподілу деформацій у залізобетонній балці та їх складових з використанням оптико-цифрової кореляції зображень деформівної поверхні.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані результати наукових досліджень знайшли застосування у практиці, а також будуть використані при створенні нормативно-методичних рекомендацій щодо оцінювання довговічності та залишкового ресурсу мостів. Результати досліджень використано при реконструкції автодорожнього мосту у Львові та підземного переходу метро «Святошин» м. Київ.

Особистий внесок здобувача полягає у розробленні моделі деформування і руйнування залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами. Автору належить ідея визначення полів деформацій на локальних ділянках залізобетонних мостів оптико-цифровим методом.

В опублікованих працях у співавторстві [2, 3, 5, 6, 10, 11, 12, 18, 21] здобувачу належить:

- аналіз та синтез відомих методів підсилення залізобетонних балок композитними стрічками;

- проведення експериментальних досліджень в лабораторії та оброблення отриманих результатів;

- проведення експериментальних натурних випробувань.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідались на 9 міжнародних конференціях у тому числі: 50-ій науково-технічній конференції «Naukowo-badawczy problemy budownictwa», (Польща, Криниця, 2004, 2007) «Inżynieria i Budownictwo», NR, 2005 «Сучасні покрівельні та гідроізоляційні матеріали для будівництва» (Київ, 2004), «Проблеми корозії та протикорозійного захисту металів» (Львів, 2006), «Мости і тунелі»: Теорія, дослідження, практика (Дніпропетровськ, 2007).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 128 найменування на 13

сторінках та 8 додатків. Загальний обсяг основної частини становить 181 сторінка, у тому числі містить 80 рисунків (1 з яких займає всю сторінку) і 20 таблиць.

Публікації. Основні матеріали дисертаційної роботи викладено в 21-ій науковій праці, з них 2 статті у міжнародних виданнях, що входять у наукометричну базу даних SCOPUS.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* висвітлено стан проблеми з підсилення залізобетонних балок композитними стрічками, обґрунтовано актуальність, визначено мету досліджень та завдання для її досягнення, показано наукову новизну, практичне значення та апробацію результатів роботи.

У *першому розділі* приведено огляд літератури, що висвітлює особливості розрахунку підсиленних балок. Зроблено критичний аналіз сучасного стану досліджень, а також сформульовано мету і задачі роботи.

У *другому розділі* розроблено модель для розрахунку довговічності підсиленої залізобетонної балки, згідно якої втрата несучої здатності наступить коли у розтягнутій арматурі буде досягнута границя текучості матеріалу з одночасним руйнуванням композитної стрічки і стиснутої зони бетону. Для оцінювання пошкоджень в залізобетонній балці за циклічного деформування введено гіпотезу, що базується на енергетичному підході і передбачає встановлення міри пошкодження в найбільш навантаженому місці, тобто руйнування залізобетонної балки, підсиленої композитними матеріалами, відбувається тоді, коли енергія пружно-пластичного деформування досягне енергії руйнування композитної стрічки. Початкові локальні енергетичні запаси матеріалу стрічки визначаються питомою енергією руйнування за статичного навантаження W_c , з діаграми деформування $\sigma(\varepsilon)$

$$W_c = \int_0^{\varepsilon_c} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (1)$$

де: ε_c – критична деформація матеріалу.

Енергетичні втрати елементарного об'єму матеріалу впродовж заданої експлуатації визначаються кількістю циклів навантаження n ($1 \leq n \leq N$), які можна встановити на основі залежності

$$W = W_s(\varepsilon, \sigma) + W_f(\Delta\varepsilon, \Delta\sigma, n), \quad (2)$$

де: $W_s(\varepsilon, \sigma)$ – статична складова енергетичних втрат;

$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$, $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ - розмахи деформацій та напружень відповідно на першому циклі навантаження

$$W_S = (\varepsilon_{\max}, \sigma_{\max}) = \int_0^{\varepsilon_c} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (3)$$

де: $W_f(\Delta\varepsilon, \Delta\sigma, n)$ – циклічна складова енергетичних втрат за n циклів навантаження

$$W_f(\Delta\varepsilon, \Delta\sigma, n) = \sum_{i=1}^n w_i(\Delta\varepsilon, \Delta\sigma);$$

$$w_i(1-R) = \int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon - \text{енергетичні втрати на } i\text{-му циклі навантаження.}$$

Сумарні відносні енергетичні втрати за n циклів навантаження визначаємо параметром $\lambda(n)$ і тоді критеріальне рівняння набуде вигляду

$$\lambda(n) = \frac{W}{W_c} = 1. \quad (4)$$

Для визначення вказаних характеристик розроблено методику і проведено експериментальні дослідження. Величину енергії руйнування композитної стрічки визначали за розтягу плоского зразка шириною 50 мм і товщиною 1,2 мм із повної діаграми деформування. Енергію руйнування арматури визначали за розтягу стандартного зразка $\varnothing 10$ мм на основі побудованої істинної діаграми «напруження - деформація» з використанням методу цифрової кореляції зображень (ЦКЗ). Для бетону енергію руйнування визначали шляхом випробування кубових зразків 100x100x100 мм на стиск із записом повної діаграми деформування, при цьому величину деформацій реєстрували на боковій поверхні зразка методом ЦКЗ.

За отриманими результатами випробувань встановлювали характеристики міцності композитної стрічки σ_f , ε_f за статичного навантаження.

На основі цього отримали трансцендентне рівняння, яке розв'язували числовим методом і встановлювали число циклів навантаження до руйнування залізобетонної балки з наклеєною композитною стрічкою

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{(\sigma_f - \sigma_{\max})^2}{E} (2N_f)^{-b}. \quad (5)$$

де: σ_{\max} – максимальне напруження циклу, $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}$ – розмах деформації, σ_f – істинні напруження руйнування композитної стрічки, b – коефіцієнт регресії, який визначають із експерименту.

Для оцінювання напружено-деформованого стану у залізобетонній балці, підсиленій композитними матеріалами, та визначення довговічності розроблено метод ЦКЗ, який базується на визначенні поля переміщень при деформуванні. Метод ЦКЗ передбачає програмну обробку низки цифрових зображень оптично-шорстких поверхонь, отриманих в процесі деформування з метою відстеження переміщень

множин точок цієї поверхні та розрахунку деформацій. Цифровою камерою реєструють два цифрових зображення досліджуваної поверхні, одне з яких відповідає вихідному, а наступне після деформування. При цьому фіксують вертикальні V і горизонтальні U переміщення двох довільних точок A і B розташованих на поверхні. Кожній точці відповідає піксель даного цифрового зображення. Після прикладання зовнішнього навантаження знаходять нові положення точки A' і B' . Ідентифікацію цих точок знаходять на підставі порівняння розподілу відтінків пікселів. Ця ділянка є маркером для відстеження переміщення точки, що знаходиться в її центрі.

В подальшому за відповідним алгоритмом, закладеним у програмне забезпечення (ПЗ) для ЦКЗ на зображенні деформованої поверхні, знаходиться ділянка з аналогічним розподілом відтінків пікселів і на цій підставі визначаються координати точок A' і B' та компоненти U і V переміщень відносно початкових положень на вихідному зображенні.

Величину деформацій розраховують за формулами, що закладено в алгоритм ПЗ

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right], \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Для дистанційного визначення деформацій та прогину мостових балок розроблена методика з використанням оптико-цифрового корелятора (ОЦК). Вимірювальна частина ОЦК виконана у двох варіантах – переносний, для визначення прогину мостових балок, і стаціонарний, для локального довготривалого моніторингу деформацій у найбільш навантажених місцях. Принципова схема вимірювань наведена на рис.1.

Реалізація розробленої методики була апробована при циклічному деформуванні залізобетонної балки (100x210x2100мм), яку випробовували на універсальній гідравлічній установці за силовою схемою триточкового згину при асиметрії циклу $\rho=0,33$. Реєстрацію поздовжніх відносних деформацій посередині сторони 1 здійснювали за допомогою рівномірно закріплених по висоті п'яти тензодавачів. Протилежну поверхню балки (сторона 2) використовували для реєстрації поля переміщень на лінії тензодавачів для визначення деформацій за висотою методом ЦКЗ.

На рис. 2 показано розподіл деформацій, встановлений методом ЦКЗ з використанням віртуальних екстензометрів. Величини деформацій, визначені методом ЦКЗ з допомогою віртуальних екстензометрів та тензодавачів добре корелюють між собою.

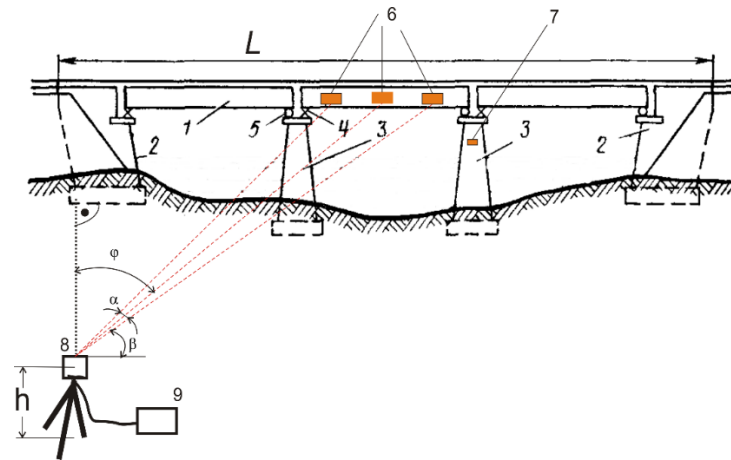


Рис. 1. Схема вимірювання прогину мостових балок переносним ОЦК

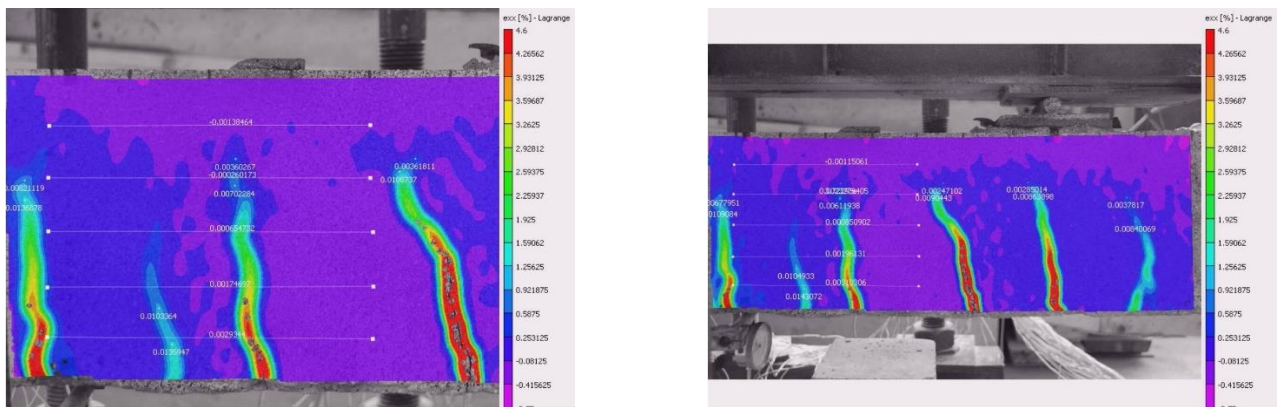


Рис. 2 . Розподіл деформацій отриманий методом ЦКЗ

У *третьому розділі*, що присвячений розробці методики експериментальних досліджень для визначення довговічності залізобетонних балок таврового перерізу, підсилених композитною стрічкою, та підтвердження співвідношення (5). Випробовували Т-подібні зразки за статичного триточкового згину для вибору межі циклічного навантаження. Одну партію зразків Т-I випробовували без підсилення, а партію Т-II, після наклеювання композитної стрічки CFRP типу S512 шириною 50 мм і товщиною 1,2 мм з додатковим анкеруванням приопорних зон балки шляхом наклеювання композитного полотна. Навантаження здійснювали ступенями і реєстрували величину прогину балки та розподіл переміщень за висотою.

За величиною переміщень за висотою встановлювали значення деформацій в композитній стрічці, на рівні арматури і стиснутої зони бетону. Для невідсиленої балки (Т-1) руйнування відбувалось внаслідок текучості поздовжньої арматури з одночасним дробленням стиснутої зони бетону в околі контакту із зосередженою силою. Процесу руйнування характерні ознаки в'язкого механізму із швидким наростанням деформацій арматури, верхніх фібр бетону та збільшенням величини прогину без зростання зусилля навантаження. Максимальні середні деформації стиснутої зони бетону при руйнуванні

балки досягали $\varepsilon_b = 192 \times 10^{-5}$, а нижнього ряду арматури $\varepsilon_c = 341 \times 10^{-5}$. Визначена методом ЦКЗ середня висота стиснутої зони бетону становила 2,5 см. Несуча здатність підсиленої балки зросла на 20%, а руйнування відбулось за межами підсилення.

При цьому спостерігалась текучість нижньої арматури з одночасним дробленням стиснутої зони бетону.

Деформація в арматурі підсиленої балки знизилася на 20% за однакової завантаженості балок. Величина стиснутої зони становила 4,6 см. На підставі аналізу розподілу деформацій встановлено, що при навантаженні в межах $0,4 \div 0,5$ від руйнівного залежність підпорядковується прямолінійному закону. Встановлені величини для підсиленої балки зменшують на 20% прогин в центрі, що пояснюється зниженням напружень в арматурі та деформацій у стиснутій зоні бетону.

Циклічні навантаження балок проводили за асиметрії циклу $\rho=0,33$. Коефіцієнт завантаженості $\gamma = M_{\max}/M_u$ (де M_{\max} – максимальний, M_u – руйнівний згинальні моменти) вибирали в межах $0,3 \div 0,4$) Базову кількість циклів приймали $2 \cdot 10^6$ циклів. У процесі випробувань з допомогою ЦКЗ реєстрували величину переміщень за висотою балки та прогину посередині прольоту. Через певну кількість циклів навантаження розраховували значення максимальної ε_{\max} і мінімальної ε_{\min} деформацій. За розподілом деформацій за висотою балки встановлювали величину напружень у стрічці, розтягнутій арматурі і стиснутій зоні бетону.

Характер руйнування непідсиленних балок за циклічного навантаження відрізнявся від статичного і був наближений до крихкого, яке відбувалось за менших деформацій. Руйнування підсиленої балки від циклічного навантаження настало передчасно при $N=1020 \cdot 10^3$ циклів, внаслідок розриву зварного з'єднання в приопорній зоні при суцільній композитній стрічці (рис. 3). При цьому без порушень клейового з'єднання стрічки з бетоном та місць анкерування. За цих умов встановлено збільшення довговічності підсиленої балки до 20%.

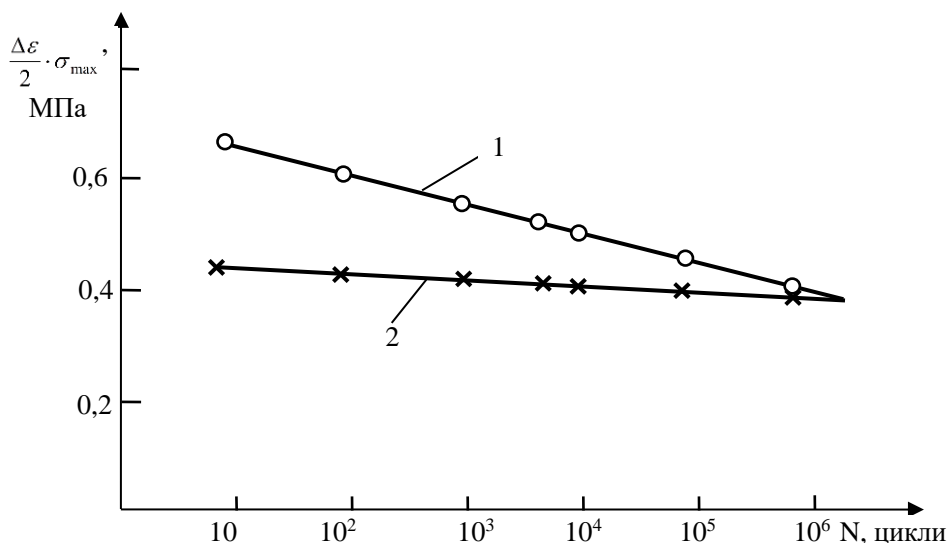


Рис. 3. Довговічність підсиленої балки Т-II за циклічного навантаження (1-арматура, 2 - композитна стрічка)

Проведені випробування арматурних стержнів на втомну міцність підтвердили висновок, що зварні з'єднання понижують характеристики втомної міцності до 20÷40%, що необхідно враховувати при проектуванні залізобетонних елементів.

Досліджено, що циклічні навантаження впливають на зміну основних деформативних характеристик, зокрема кривини і жорсткості перерізів. Для цього встановлено аналітичні співвідношення та методику експериментальних досліджень при визначенні зміни жорсткості та кривини залізобетонної підсиленої балки в залежності від кількості циклів навантаження. Враховуючи загальну тенденцію у зниженні механічних характеристик бетону, арматури і композитної стрічки, що впливає на зміну жорсткості D підсиленої балки, залежність можна виразити у вигляді спадної функції від кількості циклів навантаження N . $D = D(N)$.

Величина жорсткості балки пропорційна енергетичним витратам композитної стрічки та кількості циклів навантаження.

В граничному випадку при руйнуванні стрічки жорсткість балки дорівнює нулю.

Структура залежності жорсткості балки від часу експлуатації буде такою:

$$D(N) = D_0 \left[1 + \alpha \frac{N_*(N_* - N)^b}{N} \right], \quad (7)$$

де: D_0 – початкова жорсткість залізобетонної балки, N_* – довговічність при заданих умовах навантаження, α – параметр знайдений з експерименту, b – коефіцієнт регресії.

На основі даних експериментальних досліджень побудовано графічну залежність зміни жорсткості підсиленої балки від кількості циклів навантаження (рис.4).

На основі результатів визначених методом ЦКЗ при циклічному навантаженні балки оцінено зміну кривини балки за розподілом деформацій (рис. 4).

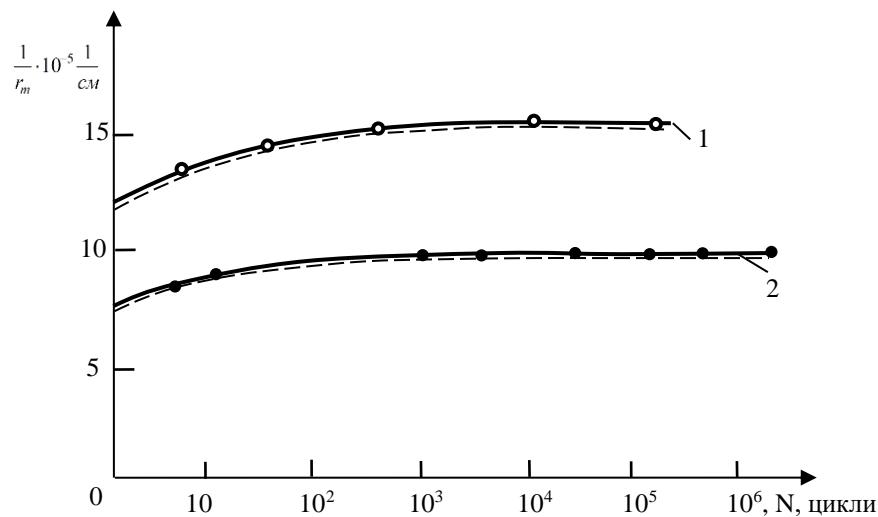


Рис. 4. Зміна кривини балки від кількості циклів навантаження:
1 – непідсилена, 2 – підсилена

Найбільш інтенсивне збільшення кривини, а також відповідне зменшення жорсткості спостерігається на початковій стадії циклічного навантаження. В подальшому, аж до втомного руйнування зміна кривини і жорсткості відбувається за прямолінійною залежністю. Зміна жорсткості протягом циклічного навантаження знизилась до 30%, а кривина відповідно збільшилась на 30% (рис. 5).

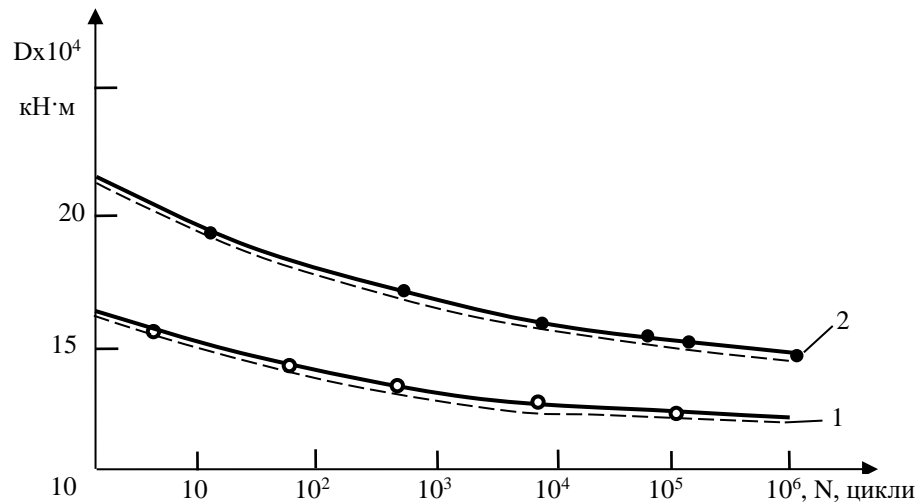


Рис. 5. Зміна жорсткості балки від кількості циклів навантаження: 1 – непідсиленої, 2 – підсиленої (○● за деформаціями — — за прогином r_f)

Дослідження напружено-деформованого стану та встановлення оптимальних параметрів приклеювання композитної стрічки CFRP до залізобетонної балки реалізували на спеціально виготовлених зразках. До залізобетонного блоку з розмірами 120 x 500 x 200 на площину 120 x 200 приклеювали стрічку шириною 120 мм. На вільний кінець стрічки шириною 120 мм і довжиною 200 мм наклеювали дюралюмінієві пластини за допомогою яких закріплювали у рухомому захоплювачі машини ЦДМПУ-200. Додатково місце приклеювання анкерували композитним полотном. Для реєстрації методом ЦКЗ зміщень стрічки відносно блоку та визначення деформацій у стрічці, бетоні і клейовому з'єднанні на поверхні блоку закріплювали маркери. Встановлено, що приклеювання стрічки до однієї площини на різну довжину забезпечує розтяг стрічки в межах деформації $(1,5 \div 2,0) \cdot 10^3$, що є недостатнім. В подальшому використовували додаткове анкерування шляхом приклеювання на бокові поверхні балки композитного полотна. Встановлено, що довжина приклеювання 200 мм і додаткове анкерування забезпечує міцність з'єднання. Відносна деформація в бетонному блоці на віддалі 30 мм від поверхні приклеювання також спадає. Максимальне взаємне зміщення стрічки відносно бетону знаходиться в межах 1 мм на довжині 300 мм (рис. 6).

Для підсиленої балки Т-II здійснено аналіз напружено-деформованого стану з допомогою методу скінченних елементів. Побудовано повномасштабну просторову розрахункову модель з 20-ти вузлових елементів на яку накладено крайові умови, а навантаження реалізували за триточкового згину. Жорстко закріплювали горизонтальні

площадки шириною 15 мм в нижній частині, обмежували переміщення вузлів у всіх напрямках (рис. 7) на основі аналізу полів переміщень, а також розподілу напружень і деформацій та використовуючи втомні характеристики матеріалів залізобетонної балки будували залежності зміни цих характеристик від кількості циклів навантаження.

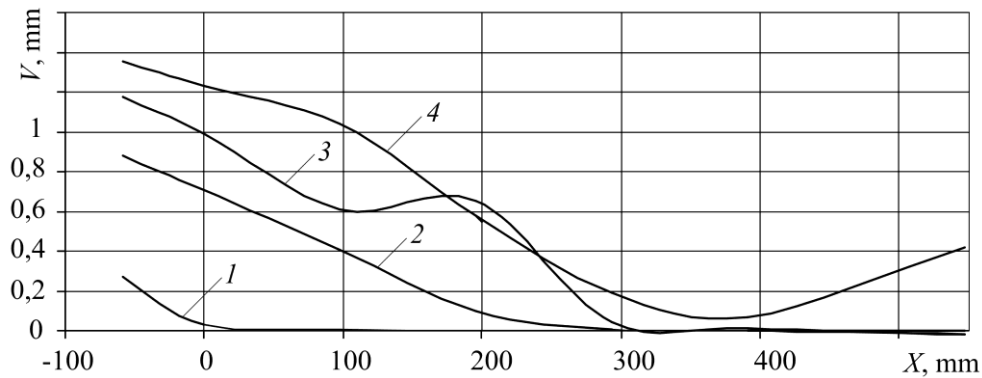


Рис. 6. Взаємне зміщення стрічки Δl відносно бетону, отримане методом ЦКЗ за переміщеннями пластинок-маркерів для різних навантажень зразка l :
1 – 5000 кг; 2 – 10000 кг; 3 – 12500 кг; 4 – 15000 кг

Порівняння результатів, отриманих МСЕ та даними експериментальних досліджень з використанням методу ЦКЗ показує їх добру збіжність, що підтверджує застосування даного підходу до оцінювання довговічності залізобетонних підсилених балок і встановлення на їх основі безпечного (залишкового) ресурсу роботи.

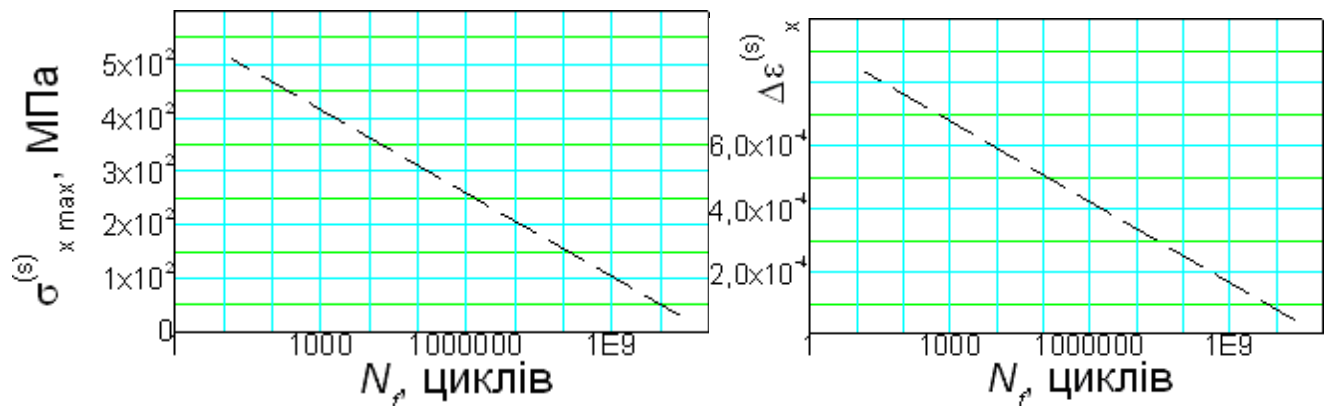


Рис. 7. Діаграма втоми для залізобетонної балки

У *четвертому розділі* наведено результати випробувань натурних мостових конструкцій, зокрема для оцінки локальних деформацій дослідної моделі мосту в масштабі 1:10 при статичному навантаженні з використанням ОЦК. Дослідна конструкція мосту виготовлена в лабораторії кафедри МБМ НУ «Львівська політехніка». Апаратурна частина ОЦК виконана у вигляді переносного пристрою, який складається з відеокамери на штативі, (рис. 8). Програмне забезпечення і алгоритм роботи ОЦК адаптовані до умови моделі

двобалкової нерозрізної збірно-монолітної залізобетонної будови моста. В процесі ступеневого навантаження моста реєстрували величину переміщень де формівної поверхні та обчислювали деформацію у двох напрямках за формулою (6) Паралельно із вимірюванням переміщень ОЦК (рис. 8) аналогічну процедуру здійснювали індикаторами годинникового типу з ціною поділки 0,001 мм.



Рис. 8. Апаратура ОЦК

Для встановлення розподілу деформацій за висотою балки методом ЦКЗ відеокамерою реєстрували зображення бокової поверхні до і після прикладання навантаження. Після цього зареєстровані зображення за допомогою ПК і спеціалізованої програми автоматично розбиваються на однакову кількість фрагментів, які відтворюють відповідні площадки поверхні. За величиною відносного зміщення фрагментів двох зображень визначають положення максимуму функції цих фрагментів.

На рис. 9 і 10 показано результати встановлених деформацій і прогинів отриманих методом ЦКЗ та індикаторами годинникового типу, які добре корелюють між собою.

З використанням методу ЦКЗ проведені дослідження при випробуванні прогонової будови шляхопроводу на автомобільній дорозі Західний обхід м. Львова км. 7÷22 Львівської області після ремонтно-відновлювальних робіт. Випробування прогонової будови проводили за програмою у відповідності з вимогами ДБН В.2.3-В-2009 статичним навантаженням. На кожному етапі випробувань за відповідних схем навантаження встановлювали зміну прогинів усіх балок в середині середнього і крайнього прольотів. Отримані дані за стандартними підходами і методом ЦКЗ та розрахунками порівнювали між собою. Паралельно з цим ОЦК визначали величину деформацій за максимального прогину для оцінювання довговічності за розмахом деформацій. За величиною деформації, визначеної ОЦК встановлено напруження, що виникають в арматурі балки за максимального навантаження, використовуючи діаграму руйнування. Величина напружень за максимального навантаження становить 100÷150 МПа, що значно менше за межу текучості. Отримані дані підставили у рівняння (5), обчислили кількість циклів навантаження N , тобто ресурс роботи балки який в даному випадку становить $1,9 \cdot 10^9$ циклів, що відповідає встановленим вимогам до даної залізобетонної балки.

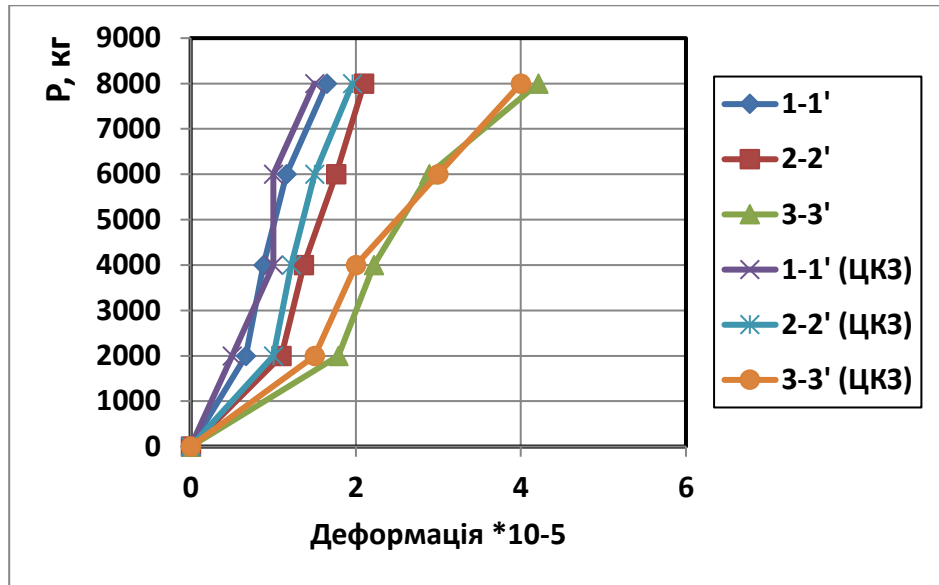


Рис. 9. Деформації між опорними точками (на базі 200 мм), отримані механічними індикаторами і методом ЦКЗ.

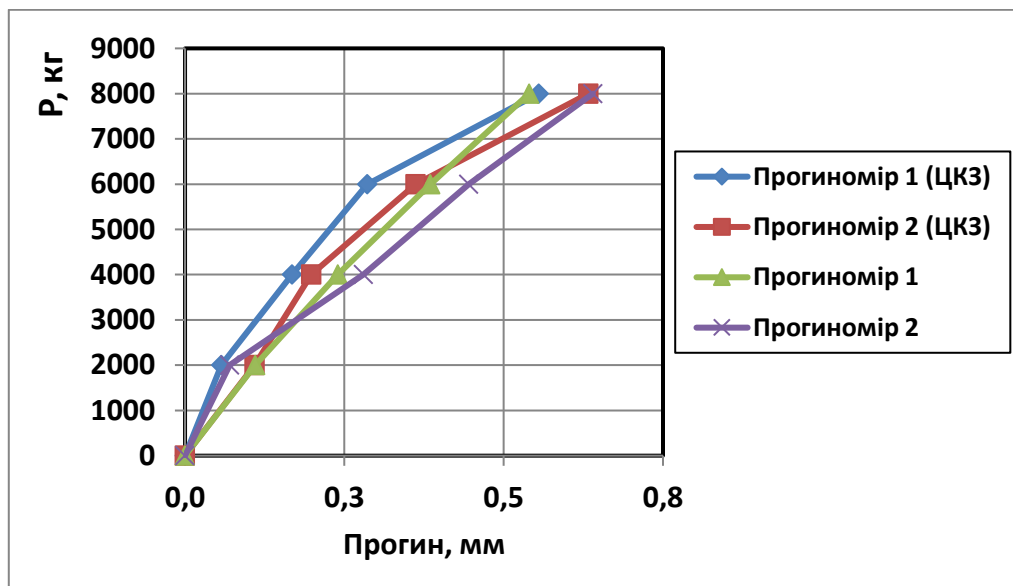


Рис. 10. Вертикальні переміщення (прогини), отримані за результатами вимірювань методом ЦКЗ і механічними прогиномірами

За результатами випробувань встановлені прогини балок в середині прольоту, виміряні при всіх схемах навантаження прогонової будови. Зміна прогину і розподіл його між балками поперек прогону відповідає умовам роботи під навантаженням. Порівняння результатів за двома методами вимірювань показує, що максимальне відхилення між величинами знаходиться в межах 5%. Для оцінювання технічного стану підземного переходу ст. метро «Святошин», м. Київ щодо можливості подальшої експлуатації проведено відповідні розрахунки і обстеження з використанням технічних засобів неруйнівного контролю.

Особливістю експлуатації переходу є наявність залізничних колій із стиковими з'єднаннями рейок, що прокладені над переходом. Внаслідок цього крім статичного відбувається динамічне навантаження плити перекриття та її пошкодження. Перекриття виконане із залізобетонних плит 4П-1а розміром 424x1500x500, які з одного боку опираються на залізобетонну стіну, а з іншого – на колони уздовж осі переходу. Плита піддана дії циклічних навантажень від руху потяга, а також динамічним при проїзді стику рейок.

Напружено-деформований стан та визначення величини прогину залізобетонного блоку реалізували МСЕ. Повномасштабну просторову твердотільну модель будували з призматичних 20-ти вузлових елементів. На основі аналізу полів вертикальних переміщень моделі встановлено, що прогин нижньої грані повздовжньої балки залізобетонного блоку за експлуатаційного навантаження становить $0,56 \div 0,67$ мм, а при динамічному навантаженні відповідно $2,04 \div 2,4$ мм.

Для експериментального визначення прогинів і вібрацій блочного перекриття за реальних умов експлуатації використовували лазерну оптико-цифрову систему (ЛОЦС) та тензометричну систему (ТС). ЛОЦС включає напівпровідникові лазерні модулі, які закріплені в точках контролю блочного перекриття (рис.11) і віброреєстратора, встановленого на віддалі 3 м (рис. 12). ЛОЦС реєструє переміщення і вібрації з дискретністю 10 мм, амплітудою 8 мкм і частотою 25 Гц. Паралельно, в точках заміру встановлювали тензометричні профілографи. За результатами вимірювань встановлено величину прогинів залізобетонних блоків, які подано у таблиці 1.



Рис. 11. Лазерні модулі закріплені на плиті перекриття



Рис. 12. Відререєстратор

Таблиця 1

Результати вимірювання прогинів залізобетонних блоків типу 4П-1а перекриття підземного переходу (станція метро «Святошин»)

Ділянка контролю	Прогин блока, мм (ТС) Частота реєстрації 200Гц		Амплітуди прогинів блока, мм (ЛОЦС) Частота реєстрації 50Гц		Деформація, $\times 10^{-4}$	Розрахунковий прогин за проїзду вагону вагою 94 т (7,6 т/м ²)	Розрахунковий прогин за проектного навантаження (27,3 т/м ²)
	усереднений	максимальний	середня	максимальна			
Північна сторона							
Колія 4	0,65	0,72	0.23	0.75	$0,677 \cdot 10^{-4}$	0,57÷0,67	2,04÷2,40
Колія 3 (без стику)	0,49	0,63	0.1	0.5	$0,593 \cdot 10^{-4}$		
Південна сторона							
Колія 1	0,70	0,84	0.12	0.9	$0,789 \cdot 10^{-4}$		

В результаті прийняте рішення про проведення ремонтно-відновлювальних робіт на даному переході.

ВИСНОВКИ

Дана робота вирішує важливу науково-технічну задачу з оцінювання довговічності залізобетонних елементів, підсилених композитними матеріалами та розробленні підходів і технічних засобів для моніторингу деформацій в мостових конструкціях.

За результатами роботи можна сформулювати наступні висновки:

1. Вперше сформульовано розрахункову модель для втомного визначення довговічності залізобетонних елементів, підсилених композитними матеріалами та встановлення залишкового ресурсу роботи на основі енергетичного підходу.

2. Запропоновано нову методику з визначення та контролю напружено-деформованого стану у підсилених залізобетонних мостових балках з використанням неруйнівного методу ЦКЗ.

3. Розроблено нову методику та алгоритм розрахунку для здійснення дистанційного контролю зміни прогину мостових балок в процесі експлуатації з використанням стаціонарного ОЦК.

4. Побудовано діаграму втомного руйнування залізобетонної підсиленої балки та встановлено, що причиною передчасного руйнування є наявність зварних швів каркасу.

5. Побудовано діаграму втомного руйнування для арматурної сталі та зварного з'єднання. Встановлено, що наявність зварного шва пришвидшує зниження несучої здатності та зменшує довговічність на 20÷40%. Запропоновано за можливістю зварне з'єднання замінити з'єднанням обтисковою втулкою.

6. Розроблено нову методику та алгоритм розрахунку розподілу деформацій з допомогою стаціонарного ОЦК при випробуванні прогонових будов шляхопроводу та визначено залишковий ресурс роботи залізобетонної балки.

7. Розроблено нові підходи щодо оцінювання стану пішохідного підземного переходу метро «Святошин» з допомогою оптично-цифрових та розрахункових методів для встановлення терміну безпечної експлуатації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові фахові видання, які опубліковані закордоном та входять до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS:

1. Собко Ю.М. Захист металевих конструкцій проти корозії системами Сіка / Собко Ю.М., Сінякін А.Г., Панченко О.В. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2006. спец.вип. № 5, том 2, С. 828–833.

Sobko Y Sinyakin A Panchenko O (2006) Steel Structures Corrosion Protection by Sika Systems. *Materials Science*. Spec. ed. Vol. 2, no. 5, pp. 828–833.

2. Панченко О.В. Методика оцінювання напружено-деформованого стану у підсиленних залізобетонних конструкціях / Панченко О.В. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2013. № 2. С. 116–120.

Panchenko OV (2013) A Procedure for the Estimation of the Stress-Strain State in Reinforced Ferroconcrete Structures. *Materials Science*. Vol. 49, no. 2, pp. 116-269.

3. Панченко О.В. Визначення довговічності залізобетонних мостових балок, підсиленних композитними матеріалами / Панченко О.В., Іваницький Я., Кунь П.С., О.Д. Журавський // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. 2017. №5. С.73–77.

Panchenko OV Ivanytskyi YaL Kun PS and Zhuravskyi OD (2017) Determination of the Durability of Ferroconcrete Bridge Beams Reinforced by Composite Strips. *Materials Science*. Vol. 53, no.5, pp. 73–77.

Наукові фахові видання України:

4. Кваша В.Г. Сучасні технології ремонту і підсилення мостів / Кваша В.Г., Панченко О.В. // *Зб. Автомобільні дороги та дорожнє будівництво*, Київ, 2002, вип.65, С.45–50.

5. Сінякін А.Г. Реконструкція шлаковозной эстакады №32 на комбинате Криворожсталь / Сінякін А.Г., Тарнопольский Д.И., Панченко А.В. // *Сб. Строительство материаловедение машиностроение*. Днепропетровск, 2003, вып. №25, С. 73–77.

6. Фукс Г.Б. Опыт применения строительных технологий и материалов фирмы Sika при ремонте эстакады Южного моста в Киеве / Фукс Г.Б., Панченко А.В., Синякин А.Г. // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, Київ, 2004, Вип. 69, С. 254–259.

7. Синякин А.Г. Технология капитального ремонта Игреноского моста в Днепропетровске / Синякин А.Г., Панченко А.В., Ярмо А.Н. // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, Київ, 2004, Вип. 69, С.229–233.

8. Кваша В.Г. Перший залізобетонний міст у Львові та його відновлення / Кваша В.Г., Гнідець Б.Г., Панченко О.В // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2006, Вип. 73. С. 113–116.

9. Синякин А.Г. Реконструкция мостового перехода по плотине Каховской ГЭС / Синякин А.Г., Панченко А.В., Собко Ю.М., Тарнопольский Д.И // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*, Київ, 2006, Вип. 73, С. 289–292.

10. Кваша В.Г. Підсилення попередньо напружених залізобетонних балок довжиною 33,0 м наклеєними вуглепластиками при реконструкції автодорожнього моста / Кваша В.Г., Салійчук Л.В., Собко Ю.М., Панченко О.В. // *Зб. НДІБК Будівельні конструкції*. Київ, 2007, Вип. 67, С. 626–635.

11. Кваша В.Г. Підсилення плоского монолітного залізобетонного перекриття багатоповерхового будинку з використанням наклеєних вуглепластиків / Кваша В.Г., Салійчук Л.В., Собко Ю.М., Панченко О.В. // *Вісник Теорія і практика будівництва*. Львів, 2009, №635, С. 126–132.

12. А.В. Панченко. Опыт ремонта и реконструкции различных железобетонных сооружений в энергетике с использованием технологий Sika / А.В. Панченко, Ю.М. Собко, А.Г.Синякин // *Вісник донбаської національної академії будівництва і архітектури*, Макіївка, 2009, Вип. 4(78), С. 203–207.

13. Панченко О.В. Гнучкі стержневі анкери при розширенні і підсиленні залізобетонних мостів / Панченко О.В., Кваша В.Г., Салійчук Л.В.// *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Харків, 2012. Вип. 58. С. 46–53.

Наукові фахові закордонні видання:

14. Kwasza W. (2005) O naprawie zabytkowej kładki dla pieszych w Politechnice Lwowskiej / Kwasza W., Hnidec B., Panchenko A. // *Inzynieria i Budownictwo*, no. 4, pp. 200–201.

15. Синякин А.Г. Опыт использования материалов и технологий концерна СИКА для ремонта инженерных сооружений / Синякин А.Г., Панченко А.В. // *Вестник*

белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, Белгород, 2007, №3, С. 121–124.

Інші видання:

16. Синякин А.Г. Добавки концерн Sika для модификации бетонов / Синякин А.Г., Панченко А.В. // *Бетон та залізобетон в сучасному будівництві: Праці наук.-практ. сем., (Київ, квітень 2006)* Київ, 2006, С. 173–178.

17. Кваша В.Г. Реконструкція автодорожнього моста з підсиленням балок $L=33,0$ м наклеєними вуглепластиками та контрольні випробування / Кваша В.Г., Салійчук Л.В., Собко Ю.М., Мельниченко В.В., Панченко О.В. // *Дороги і мости*. Київ, 2007, Вип. 7, том I. С. 203–213.

18. Собко Ю.М. Ремонт та підсилення шляхопроводу на обході м. Вінниця після аварії від удару транспортним засобом / Собко Ю.М., Панченко О.В. // *Теорія і практика будівництва: Праці міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 2007)*, Львів, 2007, №600, С. 274–277.

19. Бамбура А. Рекомендації щодо застосування композитних матеріалів фірми Sika для підсилення залізобетонних конструкцій / Бамбура А., Гурківський О., Дорогова О., Сазонова І., Мірошник Т., Панченко О., Собко Ю. // *ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»*, ЗНТ-219-2167.13-001, Київ, 2014, 45 сторінок.

20. Панченко О.В., Журавський О.Д. Оцінка міцності закріплення і обґрунтування способу наклеювання та анкерування композитної стрічки на бетон / Панченко О.В., Журавський О.Д. // *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. КНУБА, Київ, 2018, Вип. 2, С. 209–218.

21. Kwasza W. (2007) Rekonstrukcja mosta drogowego ze wzmacnieniem belek przez przyklejenie elementów kompozytowych z włókien węglowych / Kwasza W., Salijczuk L., Sobko J., Panchenko // *A. LII konf. nauk. KILiW PANiKN PZITB Problemy naukowo badawcze budownictwa, Konstrukcje betonowe*. vol. IV. pp.149–156.

АНОТАЦІЯ

Панченко О.В. Напружено-деформований стан залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами, за енергетичним підходом. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.01 "Будівельні конструкції, будівлі та споруди" (019 – Архітектура та будівництво). – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2019.

Дисертаційну роботу присвячено експериментальним та теоретичним дослідженням залізобетонних конструкцій, підсилених вуглецевими композитними матеріалами, за енергетичним підходом, а саме балкових згинаних конструкцій.

Дисертаційну роботу виконано з метою розробки методики оцінювання довговічності залізобетонних балок, підсилених композитними матеріалами, і залишкового ресурсу роботи на основі енергетичного підходу і розвитку пошкоджень в матеріалі за циклічного деформування та технічних засобів неруйнівного контролю і використання запропонованого способу після реконструкції залізобетонних конструкцій. Для виконання поставленої мети було проведено аналітичний огляд відомих методів підсилення залізобетонних балок та методології їх розрахунку; розроблено розрахункову модель та методику розрахунку довговічності залізобетонних підсилених балок за циклічного їх деформування; сформульовано експериментальну методику з визначення несучої здатності і довговічності залізобетонних балок підсилених композитними матеріалами за статичного та циклічного навантажень; розроблено методику оцінювання напружено-деформованого стану залізобетонних балок на основі методу оптико-цифрової кореляції зображень (ОЦКЗ); досліджено несучу здатність і деформативність клейового з'єднання з використанням неруйнівних методів контролю; проведено порівняння експериментальних даних з розрахунковими за числовими методами; здійснено перевірку розроблених методик та отриманих результатів при випробуванні мостових конструкцій за реальних умов експлуатації.

Ключові слова: залізобетонні балки підсилені композитною стрічкою, довговічність, циклічні навантаження, метод цифрової кореляції зображень, оптико-цифровий корелятор, енергетичний підхід, напружено-деформований стан.

ABSTRACT

Panchenko O.V. The stress-strain state of reinforced concrete beams, reinforced by composite materials according to the energy approach. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

A thesis submitted for a degree of a Candidate of Technical Sciences (philosophy doctor) by the specialty 05.23.01 "Building constructions, buildings and structures" (019 – Architecture and Construction). – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to experimental and theoretical research of RC structures strengthened by CFRP, according to the energy approach, namely beam bending structures.

Thesis was performed for the development purpose of method for assessing the durability of RC beams strengthened by CFRP and the life resources on the basis of the energy approach and defects development in the material during cyclic deformation and technical means of non-destructive testing and the use of the proposed method after the reconstruction of RC structures. To accomplish this goal were resolved such tasks as: an analytical review of the known methods of RC beams strengthening and the methodology of their calculation was carried out; the calculation model and the calculating methodology the durability of RC strengthened beams under cyclic deformation have been developed; an experimental methodology has been formulated for determining the bearing capacity and durability of RC beams strengthened by CFRP under static and cyclic loadings; the estimation method of the stress-strain state of RC beams on the basis of the method of optic-digital image correlation (ODIC) is developed; the bearing capacity and deformability of adhesive bonding using non-destructive control methods are investigated; comparison of experimental data with numerical methods; the inspection of the developed methods and the obtained results during testing of in-situ bridge structures was carried out.

Keywords: reinforced concrete beams strengthened by composite tapes, durability, cyclic loading, digital image correlation method, optic-digital correlator, power approach, stress-strain state.

АННОТАЦИЯ

Панченко А.В. Напряженно-деформированное состояние железобетонных балок, усиленных композитными материалами, по энергетическому подходу. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.23.01 "Строительные конструкции, здания и сооружения" (019 – Архитектура и строительство). – Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, 2018.

Диссертационная работа посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям железобетонных конструкций, усиленных углеродными композитными материалами, по энергетическому подходу, а именно балочных изгибаемых конструкций. Диссертационная работа выполнена с целью разработки методики оценки долговечности железобетонных балок, усиленных композитными материалами, и остаточного ресурса работы на основе энергетического подхода и развития повреждений в материале под циклического деформирования и технических средств неразрушающего контроля и использования предложенного способа после реконструкции железобетонных конструкций. Для выполнения поставленной цели было проведено аналитический обзор известных методов усиления железобетонных балок и методологии их расчета; разработана расчетная модель и методику расчета долговечности железобетонных усиленных балок по циклического их деформирования; сформулирована экспериментальную методику по определению несущей способности и долговечности железобетонных балок усиленных композитными материалами по статического и циклического нагрузок; разработана методика оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных балок на основе метода оптико-цифровой корреляции изображений (ОЦКЗ) исследовано несущую способность и деформативность клеевого соединения с использованием неразрушающих методов контроля; проведено сравнение экспериментальных данных с расчетными по численными методами; осуществлена проверка разработанных методик и полученных результатов при испытании мостовых конструкций в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: железобетонные балки, усиленные композитной лентой, долговечность, циклические нагрузки, метод цифровой корреляции изображений, оптико-цифровой коррелятор, энергетический подход, напряженно-деформированное состояние.

